Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET
Canada Centre for Mineral and Energy Technology
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

MESURE PRECISE PAR JLTRASONS DE L'EPAISSEUR DE PRODUITS PLATS EN MOUVEMENT

J. P. MONCHALIN
NONDESTRUCTIVE TESTING SECTION

1984

This document is ... (CANMET)

Ce ... rapport ... rédigé ... de ... station ... de ... des minéraux et de l'énergie (CANMET)

MINERALS RESEARCH PROGRAM

41 pp

PHYSICAL METALLURGIE RESEARCH LABORATORIES
REPORT: MRP/PMRL 84-87(TR)

MICROMEDIA

Projet: IGM 8351-261
Projet: CANMET 360 081

Rapport: 83-261-01

"Mesure précise par ultrasons de l'épaisseur de produits plats en mouvement" *

Rapport d'avancement des travaux

par:

Jean-Pierre Monchalin
CANMET, Laboratoires de métallurgie physique
Energie, Mines et Ressources Canada
768, rue Booth, Ottawa, Ontario, K1A 0G1

4 janvier 1983

* Travail effectué dans les laboratoires de
l'Institut de génie des matériaux
Conseil national de recherches Canada
750, rue Bel-Air
Montréal, Québec, H4C 2K3

Note:

Participent aussi à ce projet, Jacques Masounave de l'IGM, à qui on doit les contacts pris avec Sidbec et Industries Valcartier, et Jean Bussière de l'IGM.

On remercie L. Reeves, d'Automation Industries, du prêt du Novascope 2000 et de plusieurs transducteurs.

I. Introduction

Plusieurs industries fabriquent des produits plats ou en feuilles de façon continue. C'est le cas de la production de produits métalliques par laminage et de la production d'une grande variété de plastiques en feuilles par extrusion et laminage. Dans les 2 cas, la possibilité de mesurer en temps réel et en plusieurs endroits l'épaisseur du produit permettra un meilleur contrôle du processus de fabrication et son amélioration.

Un tel projet a été initialisé à la suite de contacts qui ont été pris avec Sidbec, lesquels avaient fait ressortir l'intérêt de mesurer, en temps réel et en plusieurs endroits au travers de la bande, l'épaisseur de tôles sortant d'un laminoir à chaud. Après une étude sommaire des données du problème (température de la tôle et certaines exigences de la compagnie), il en est ressorti que le projet était peu faisable en utilisant une technique ultrasonore. Par la suite, d'autres contacts pris avec Industries Valcartier (IVI) ont montré que cette compagnie avait aussi un intérêt similaire pour le laminage de tôles de laiton. Dans ce cas, le laminage est fait à froid, ce qui simplifie énormément le problème. Des échantillons de tôles de laiton ont été obtenus et ont été mesurés avec le système mis en place (voir ci-dessous).

Ce rapport est organisé de la façon suivante: dans la section suivante, II, on expose le principe du système de mesure, dans la section III, ce système est décrit et des exemples d'échos observés sur des échantillons métalliques et plastiques y sont présentés. Dans la section IV, les résultats des mesures faites sur les échantillons d'IVI sont présentés. Par la suite, on discute des performances d'un appareil commercial prêté pour évaluation, le NOVASCOPE 2000 (section V), et finalement, on présente, dans la section VI, plusieurs conclusions et possibilités de développements futurs.

II. Principe

Le principe du système utilisé est basé sur les ultrasons[1]: à partir d'un transducteur ultrasonore approprié, on envoie une impulsion ultrasonore très brève sur le produit à mesurer en utilisant un jet d'eau pour le couplage (voir fig. 1); le même transducteur reçoit plusieurs échos et on mesure l'intervalle de temps entre 2 échos quelconques qui, connaissant la vitesse de propagation dans le matériau, permet d'en déduire l'épaisseur. Les signaux des différentes impulsions ou échos qui peuvent être observés avec un oscilloscope sont schématisés sur la fig. 2. On notera que l'intervalle de temps entre l'impulsion excitatrice (le "bang") et la réflexion d'interface ou les échos est constamment variable selon la position de la plaque à mesurer, car il dépend de la longueur de la colonne d'eau. Par contre, les intervalles de temps entre la réflexion d'interface et les échos dépendent uniquement de l'épaisseur du produit à mesurer. Si on mesure un intervalle de temps t, la vitesse de l'ultrason étant v, l'épaisseur ℓ est donnée simplement par la formule:

$$\ell = vt \qquad (1)$$

On a évidemment intérêt à avoir des impulsions les plus brèves possibles. Technologiquement, il est possible (mais non facile) de produire des impulsions quasi-unipolaires telles que celles schématisées sur la fig. 2. On utilisera donc des transducteurs qui, moyennant une excitation appropriée (impulsion électrique suffisamment brève), produiront de telles impulsions ultrasonores. L'eau étant couplée au travers d'une lance, le transducteur doit être focalisé, sinon le faisceau ultrasonore serait perturbé. Le point focal est choisi au voisinage de l'orifice ou au voisinage de la face d'entrée de la plaque à mesurer.

On notera que, comme le montre la fig. 2, la réflexion d'interface et les échos d'aller-retour ont une polarité différente. De plus, ceux-ci décroissent de manière quasi-exponentielle. Mathématiquement[2], si Ze est l'impédance acoustique de l'eau (Ze ~ 1.48 x 10^6 kg.s/m^2) et Zm celle du matériau

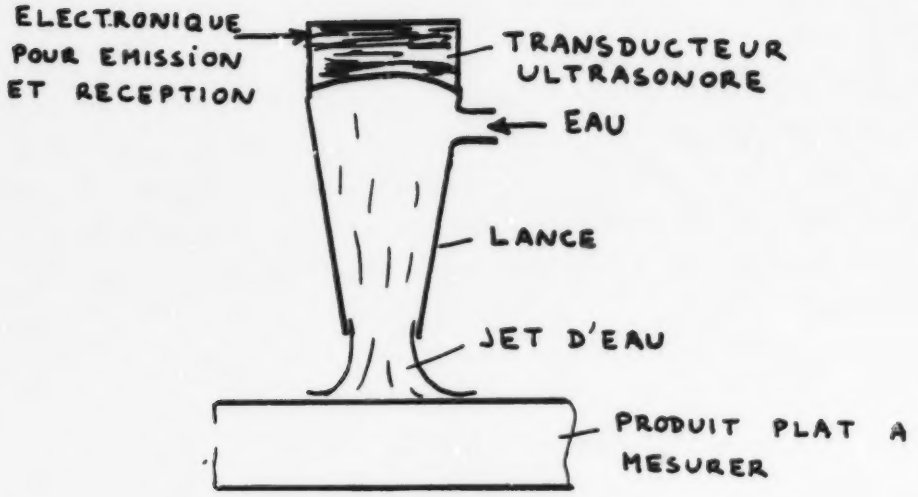


Fig. 1. Schéma décrivant la méthode de couplage des ultrasons.

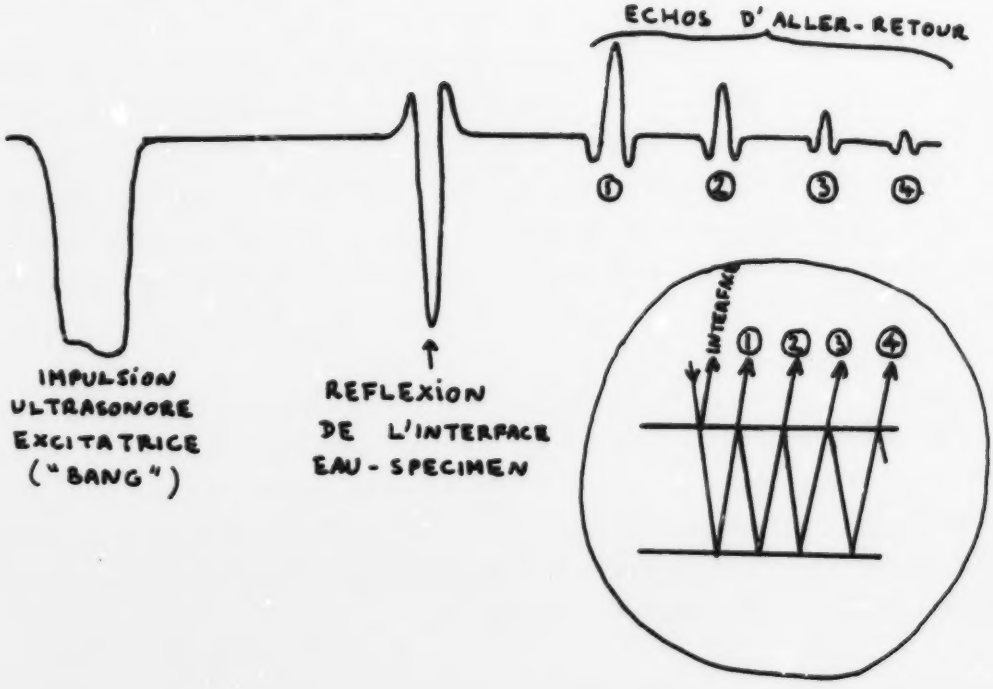


Fig. 2. Impulsions ultrasonores telles que vues sur l'écran d'un oscilloscope. L'origine des diverses impulsions est expliquée par le schéma de la partie encerclée.

($Z_m \sim 47 \times 10^6$ kg.s/m^2 pour l'acier, $\sim 40 \times 10^6$ kg.s/m^2 pour le laiton, $\sim 1.9 \times 10^6$ kg.s/m^2 pour le polyéthylène ...), si $R_{m \to e}$ est le coefficient de réflexion de l'ultrason se propageant dans le matériau à l'interface avec l'eau, ($R_{m \to e} = (Ze - Zm)/(Ze + Zm)$), et si α est le coefficient d'atténuation du matériau, on a pour une onde d'amplitude unitaire incidente perpendiculairement:

pour la réflexion d'interface, l'amplitude

$$R_{e \to m} = - R_{m \to e} = \frac{Zm - Ze}{Zm + Ze} \qquad (2)$$

et pour l'écho #n, l'amplitude

$$En = - (1 - R_{m \to e}^2) \, |R_{m \to e}|^{n-1} \, e^{-2n \alpha \ell} \qquad (3)$$

On note que, pour des matériaux tels que l'acier et le laiton, l'amplitude de la réflexion d'interface est très supérieure à celle du premier écho: en supposant que $2\alpha\ell \ll 1$, on a, pour l'acier, $R_{e \to m} \sim 0.94$ et $E_1 \sim -0.12$ et pour le laiton, $R_{e \to m} \sim 0.93$ et $E_1 \sim -0.14$. Pour un plastique tel que le polyéthylène, on a au contraire $R_{e \to m} \sim 0.13$ et $E_1 \sim -0.98$ en supposant toujours que $2\alpha\ell \ll 1$ (ce qui suppose une fréquence ultrasonore suffisamment basse).

Parmi les échos produits et la réflexion d'interface, on sélectionne avec 2 portes, deux impulsions. On mesure avec un compteur l'intervalle de temps entre ces 2 impulsions. Le point de départ et le point d'arrêt du compteur sont déterminés par des seuils de déclenchement qui, pour plus de précision, sont ajustés proportionnellement à l'amplitude de l'écho (ou réflexion d'interface). Ceci est illustré sur la fig. 3.

En pratique, du fait que la direction de la feuille peut varier, l'amplitude des échos varie. Pour compenser cette variation, on utilise une boucle de contrôle électronique qui, à partir de la mesure du maximum d'un des échos,

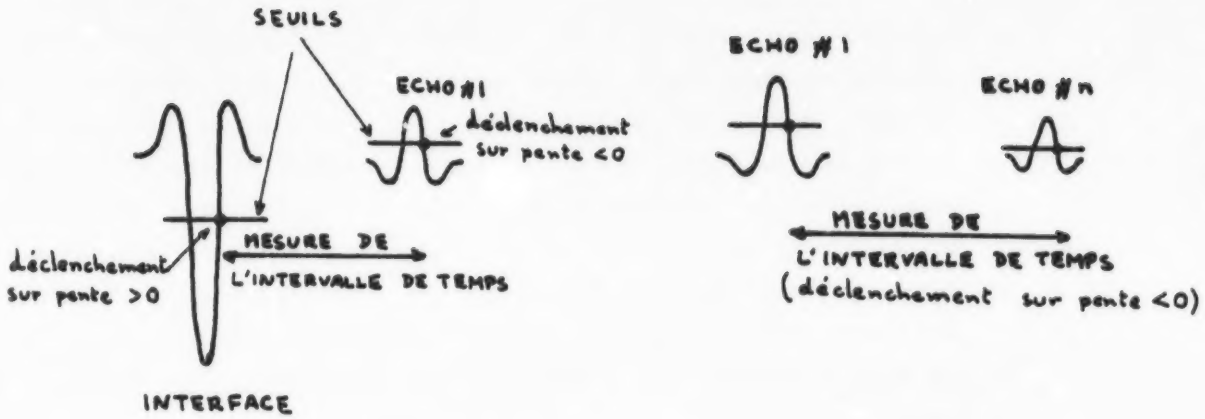


Fig. 3. Principe de la mesure de temps: a) entre la réflexion d'interface et le 1er écho, b) entre le 1er écho et un écho quelconque.

fait varier le gain du receveur ultrasonore (amplificateur) de telle façon que l'amplitude des échos se maintienne sensiblement constante. Le positionnement des portes se fait manuellement en ajustant leur délai à partir d'un point de déclenchement situé sur la réflexion d'interface. Il est aussi possible, dans certains cas, d'éliminer la première ou même les deux portes, si les échos peuvent être sélectionnés avec des seuils appropriés (voir ci-dessous: cas d'une feuille de polyéthylène d'approximativement 1 mm avec une fréquence ultrasonore de 5MHz). On conserve toutefois un créneau d'effaçage qui élimine le fort signal de l'impulsion initiale.

III. Description du système et de son utilisation

Le schéma général du système utilisé est présenté sur la fig. 4. De plus, les réglages suivants ont été effectués:

- le générateur d'impulsion est ajusté de façon à produire une impulsion ayant un minimum d'oscillation (ajustement de l'amortissement électronique et de l'amplitude de l'impulsion). Son taux de répétition est choisi le plus élevé possible de façon à pouvoir moyenner sur le plus grand nombre de comptages possible pour un intervalle de temps choisi. Il est limité par la longueur de la colonne d'eau. Si le taux de répétition est trop élevé ou la colonne d'eau trop longue, les impulsions provenant d'un ou plusieurs aller-retours dans la colonne d'eau risquent de faire déclencher les portes et ainsi de fausser complètement la mesure;

- les 2 portes et le détecteur de maximum (qui comprend une porte) déclenchent sur la réflexion d'interface. Le délai et la longueur des portes sont ajustés manuellement en observant sur l'oscilloscope. L'écho choisi pour contrôler le gain en utilisant le détecteur de maximum est généralement le même que celui sélectionné par la première porte;

- le gain du receveur est d'abord ajusté manuellement de façon à avoir une amplitude du premier écho mesuré suffisante, (généralement 1 volt). Ensuite, la boucle de contrôle est fermée et la tension de référence est ajustée de façon à retrouver la même amplitude qu'avec la boucle ouverte (voir schéma de l'électronique de contrôle sur la fig. 5). Un bon fonctionnement du circuit de contrôle de gain nécessite un ajustement approprié du gain, de la constante de temps et de l'amortissement du circuit. Ces ajustements dépendent du taux de répétition de l'impulsion initiale et, une fois ce taux choisi, on n'a plus à les retoucher;

- le compteur de temps est couplé AC et peut déclencher sur un signal de pente positive ou négative avec un seuil ajustable (positif ou négatif) sur ses 2 canaux A et B. Les 2 échos sélectionnés pour la mesure et les

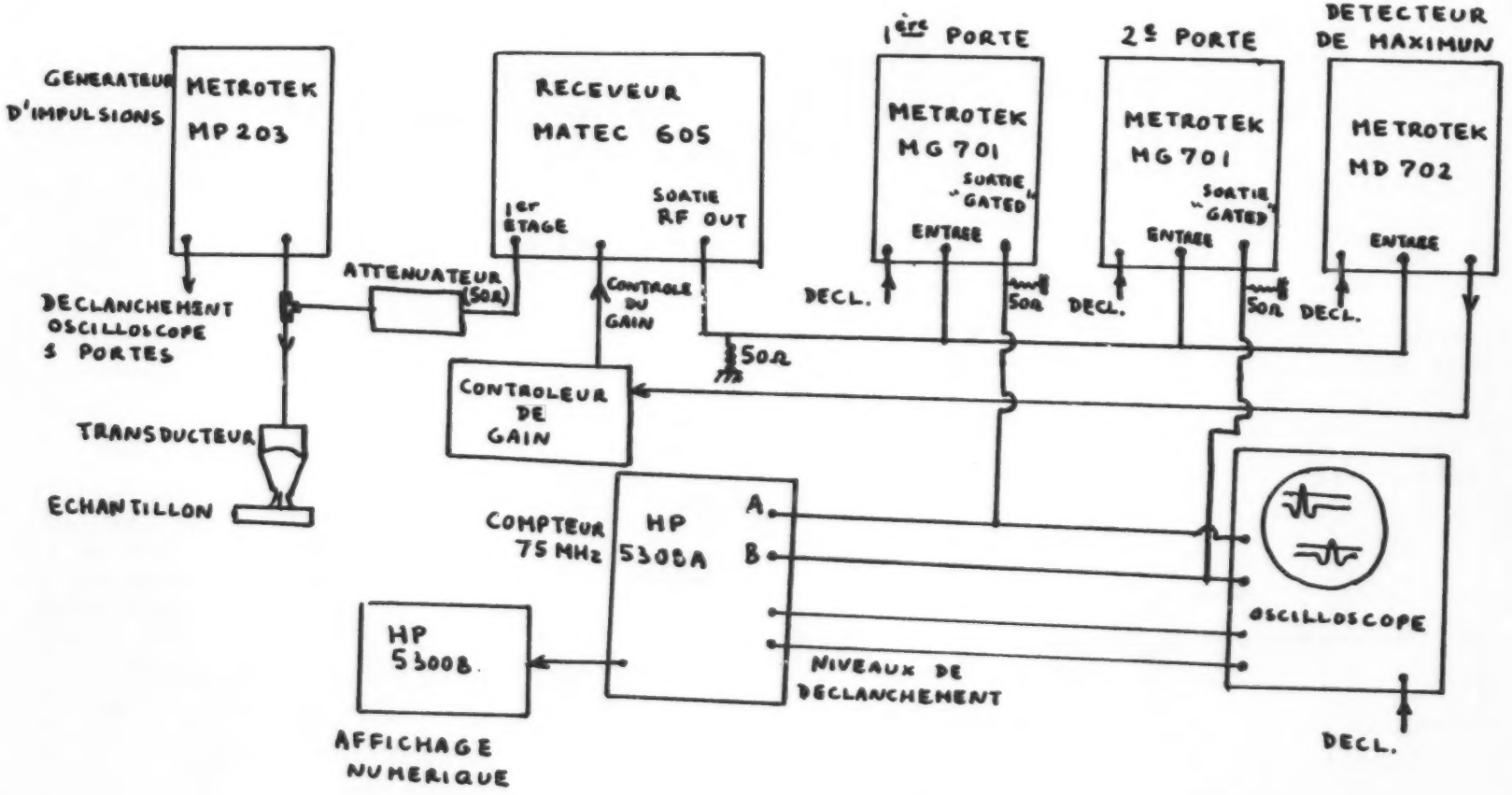


Fig. 4. Bloc diagramme général du système utilisé.

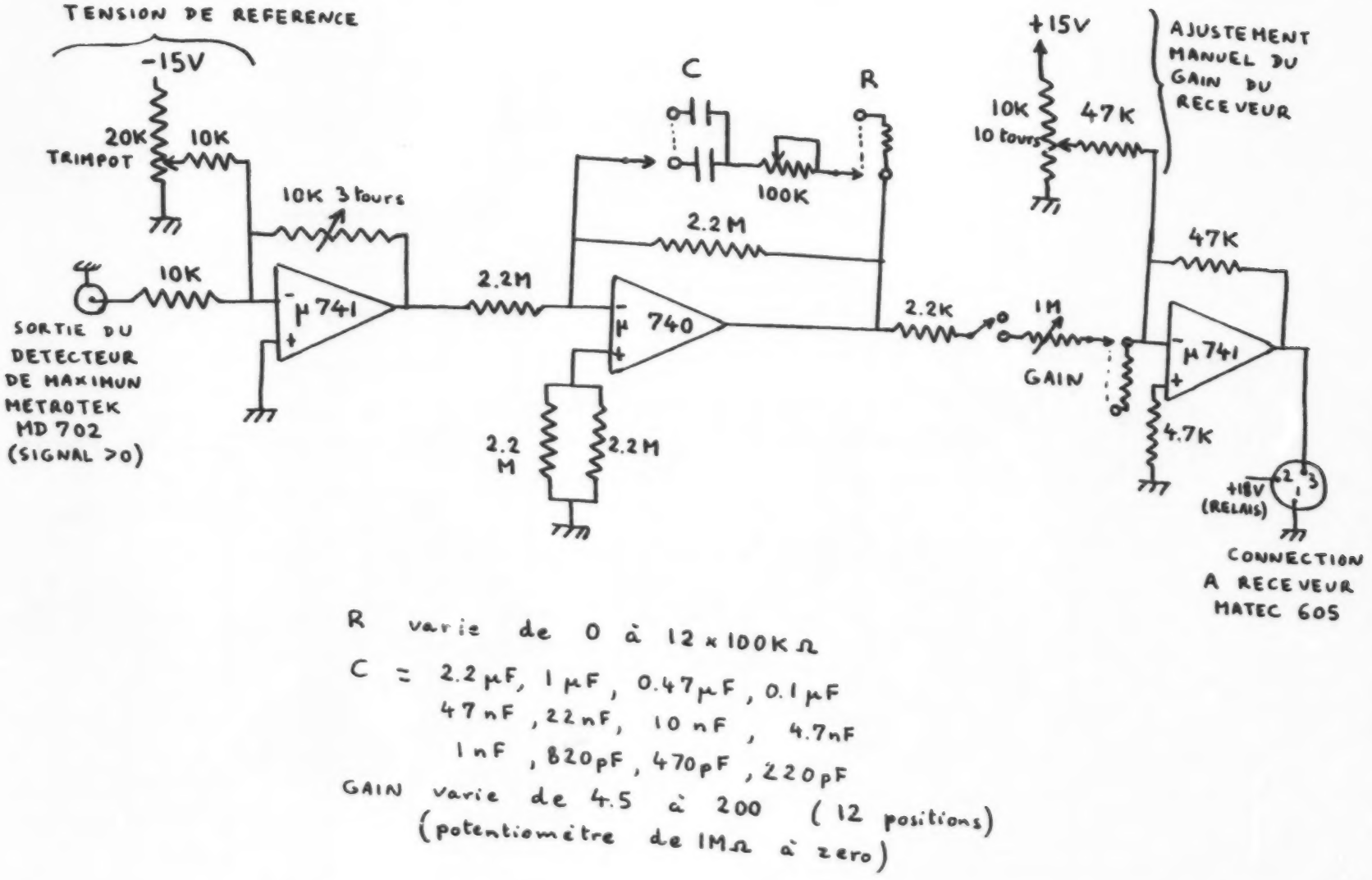


Fig. 5: Schéma du circuit de contrôle automatique du gain. La boucle est fermée, soit avec l'interrupteur, soit préférablement, ce qui évite les transitoires, en tournant le potentiomètre 10K 3 tours de zéro à maximum.

niveaux de déclenchement sont affichés simultanément sur un oscilloscope à 4 traces.

Nous présentons ci-dessous plusieurs exemples d'échos observés avec divers échantillons. On a essentiellement utilisé les transducteurs suivants:

- un transducteur focalisé fabriqué par ULTRAN, 5 MHz, distance focale ~ 11 pouces. Avec ce transducteur, on a utilisé un fonctionnement en immersion complète, le transducteur et la plaque étant placé dans une cuve remplie d'eau;

- un transducteur plan fabriqué par KB-Aerotech, 5MHz, utilisé avec une ligne à retard de 3/4 pouce. Le transducteur, avec sa ligne à retard, est simplement appliqué sur l'échantillon avec un peu d'huile;

- un transducteur focalisé fabriqué par NDT Instruments, ~ 8 MHz muni d'une lance conique (squirter) permettant le couplage par jet d'eau.

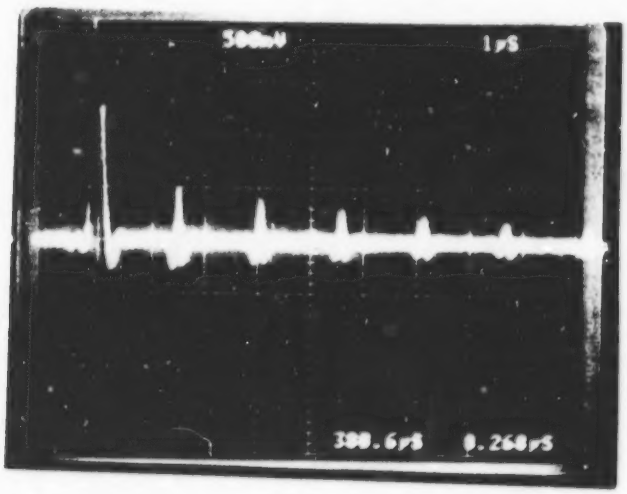


Fig. 6. Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur ULTRAN 5 MHz sur plaque de laiton jaune de 0.1331" (nominale IVI). (La trace de la partie négative de la réflexion d'interface n'est pas clairement visible sur cette photo)

On note que pour cet échantillon, on pourra facilement faire une mesure entre le 1er écho et jusqu'au 4e écho.

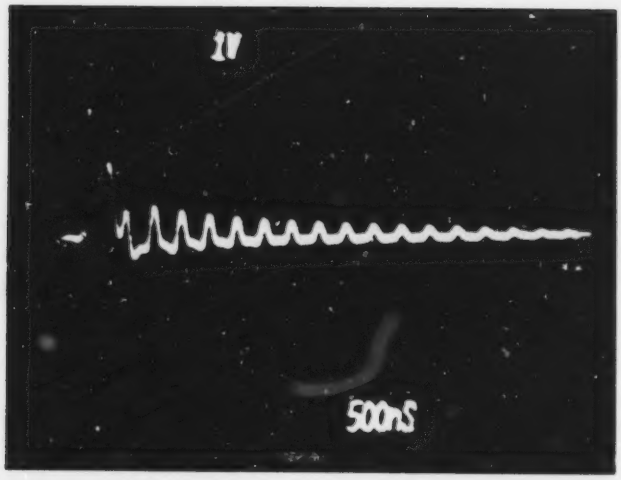


Fig. 7. Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur ULTRAN 5 MHz sur plaque de laiton jaune de 0.0193" (nominale IVI).

On observe, sur la fig. 7, une modulation de l'amplitude des échos et un changement de leur aspect qui provient du fait que la résonance de la plaque est voisine de la fréquence du transducteur. Le premier écho se distinguant à peine de la réflexion d'interface, la mesure se fait entre le 2^e et le 5^e ou 6^e écho.

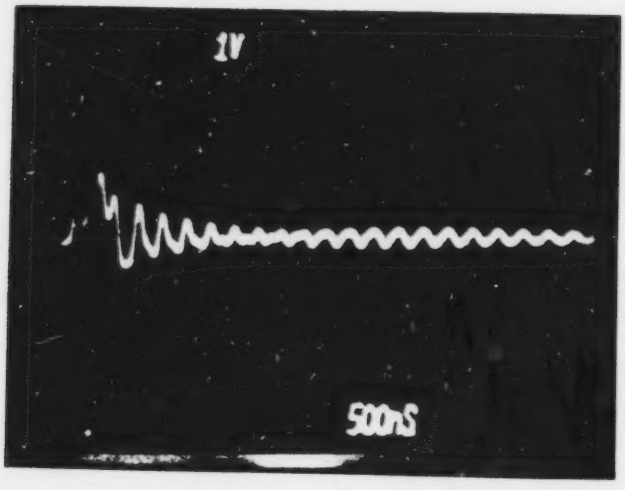


Fig. 8. Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur ULTRAN 5 MHz sur plaque de laiton jaune ~ 0.0245" (mesuré).

La plaque utilisée pour la fig. 8 étant plus épaisse, on n'observe pas la modulation notée précédemment sur la fig. 7. Une telle modulation est, par contre, notée avec l'échantillon de laiton rouge (0.0265" nominale) fourni par IVI (voir ci-dessous).

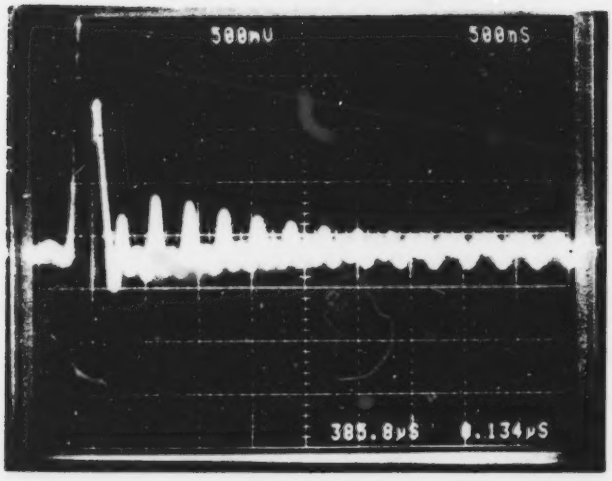


Fig. 9. Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur ULTRAN 5 MHz sur plaque de laiton rouge ~ 0.0265" (nominale IVI).

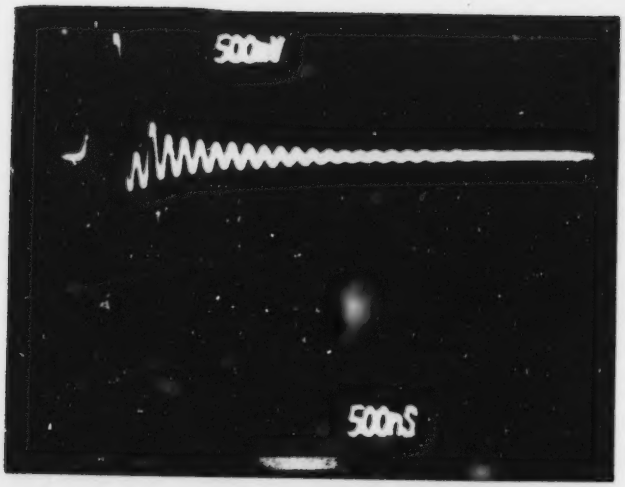
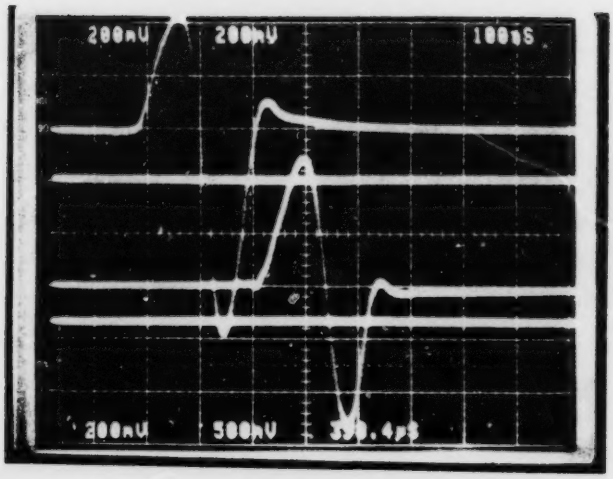


Fig. 10 Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur ULTRAN 5 MHz sur plaque de laiton jaune de 0.0145" (mesurée).

Fig. 10 montre qu'une épaisseur inférieure à 15/1000" peut être facilement mesurée. Il est possible de mesurer des épaisseurs encore plus faibles, mais on ne disposait pas d'échantillons plus minces pour pouvoir expérimenter.

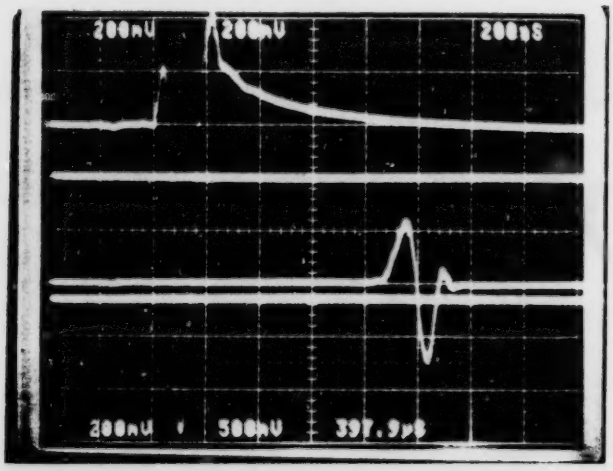
Les 2 figures suivantes présentent 2 traces d'oscilloscope typiques, observées avant de procéder à une mesure. On y voit les 2 échos sélectionnés (les amplificateurs des portes inversent le signal, si bien que les échos observés ont une polarité opposée à ceux des figures précédentes) et 2 lignes horizontales indiquant les seuils de déclenchement du compteur.



2^e écho et seuil correspondant.

3^e écho et seuil correspondant.

Fig. 11a Mesure entre le 2^e et 3^e écho, laiton de 0.0193" (nominale, IVI), transducteur ULTRAN 5MHz focalisé à 11" (les zéros des traces des seuils de déclenchement sont situés sur les lignes de base des échos).



2^e écho et seuil correspondant.

5^e écho et seuil correspondant.

Fig. 11b Mesure entre le 2^e et le 5^e écho, laiton de 0.0193" (nominale IVI), transducteur ULTRAN 5MHz focalisé à 11" (les zéros des traces des seuils de déclenchement sont situés sur les lignes de base des échos).

On notera, d'après ces figures et comme on l'avait mentionné plus haut, que les seuils de déclenchement sont ajustés proportionnellement à l'amplitude de l'écho. Ceci minimise l'erreur systématique faite sur la mesure de temps. Il existe, cependant, d'autres causes d'erreur. Il y a d'abord la variation d'amplitude et la distortion de la forme de l'écho qui a lieu quand la fréquence du transducteur est voisine de la fréquence de résonance de la plaque (voir ci-dessus figs 7 et 9). D'autre part, du fait que les fréquences ultrasonores plus élevées sont beaucoup plus atténuées que celles plus basses, il s'en suit une modification de la forme de l'écho. Lorsque le transducteur donne une impulsion quasi-unipolaire, ceci n'est pas généralement clairement visible, les échos ayant tous la forme très nette de pics (voir figs 6 et 12 ci-dessous). Par contre, lorsqu'on utilise un transducteur donnant une impulsion plus longue, on peut observer la variation de la forme de l'impulsion: voir ci-dessous fig. 13, obtenue avec un transducteur plan de 5 MHz utilisé commercialement pour mesurer les épaisseurs.

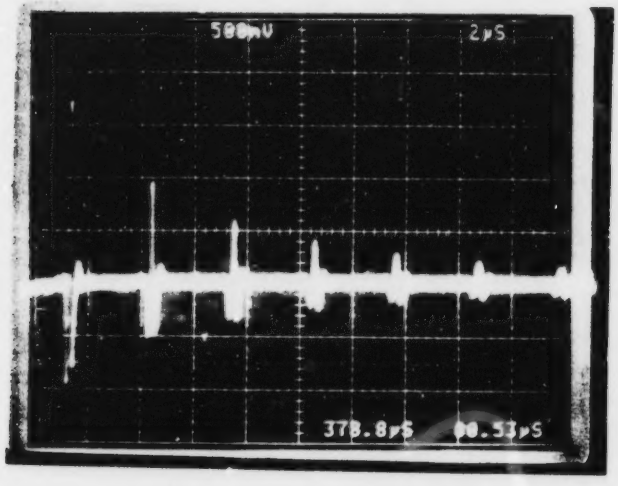


Fig. 12. Echos observés avec transducteur ULTRAN 5MHz sur laiton jaune de 0.2728" (nominale, IVI).

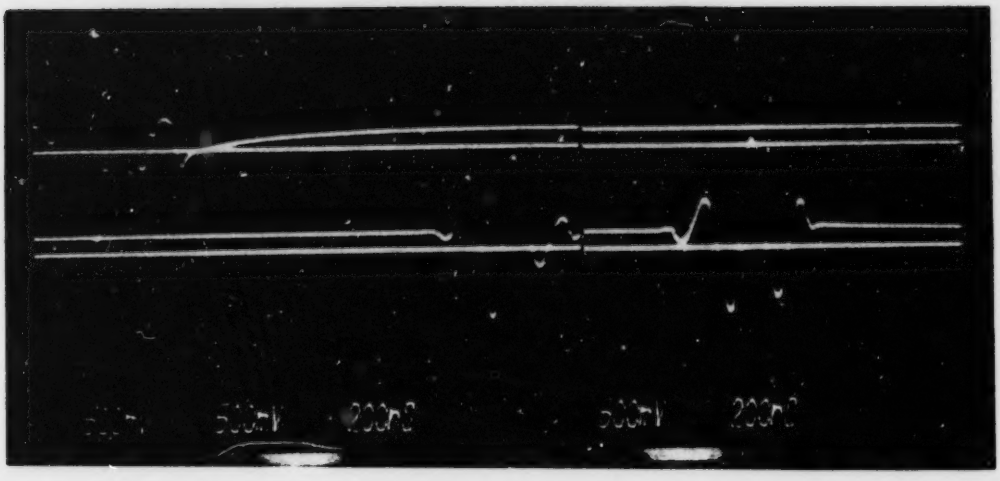


Fig. 13. 1er, 2e et 5e écho observés avec transducteur plan ALPHA 5MHz KB-Aerotech avec ligne à retard sur laiton jaune de 0.1331" (nominale IVI), transducteur appliqué sur l'échantillon.

On présente ci-dessous 2 exemples d'échos observés avec le transducteur focalisé de NDT Instruments utilisant le couplage par jet d'eau.

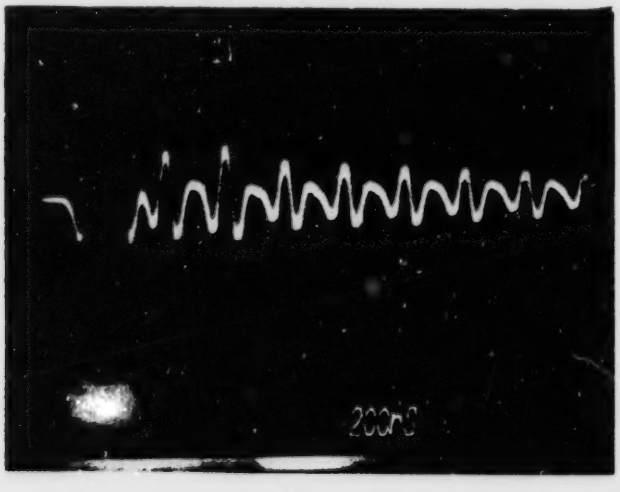


Fig. 14a. Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur de NDT Inst. (BTA-25) ~8 MHz sur laiton jaune de 0.0193" (nominale IVI), couplage par jet d'eau.

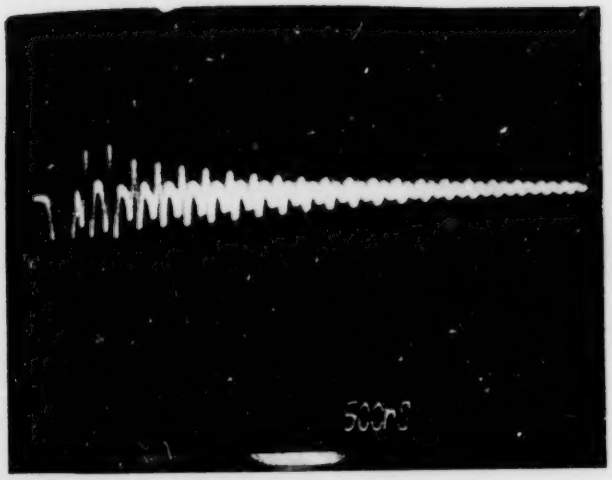


Fig. 14b. Même chose que 14a.

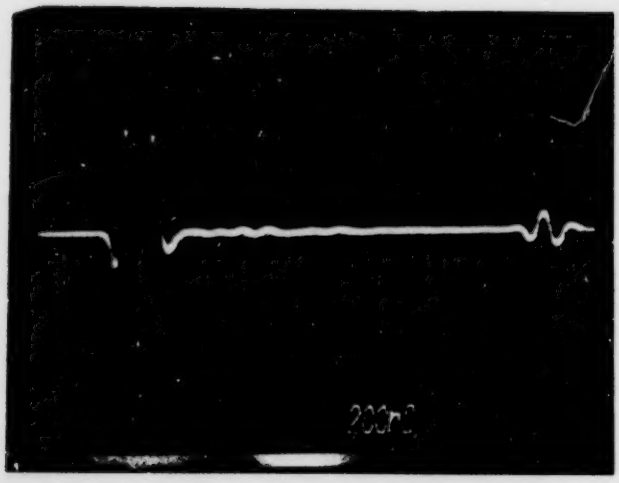


Fig. 15. Réflexion d'interface et 1er écho observé avec transducteur de NDT Instr. (BTA-25) ~ 8 MHz sur laiton jaune de 0.1331" (nominale IVI), couplage par jet d'eau.

On présente ci-dessous (fig. 16), les échos observés avec une feuille de polyéthylène (~ 0.020") produite à l'IGM avec le transducteur ULTRAN 5MHz. On notera que l'on observe pratiquement uniquement la réflexion d'interface et le 1er écho, les autres échos étant très atténués.

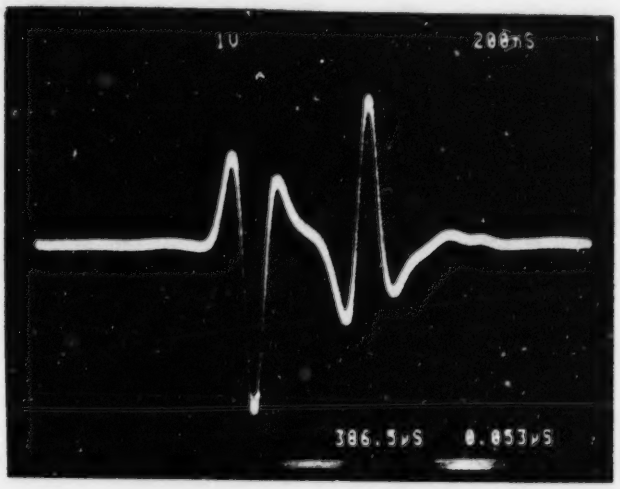


Fig. 16. Réflexion d'interface et échos observés avec transducteur ULTRAN 5MHz focalisé à 11" sur échantillon de polyéthylène (~ 0.020").

Pour mesurer l'épaisseur dans ce cas, il est nécessaire de mesurer le temps à partir de la réflexion d'interface. Comme le délai minimum des portes Metrotek utilisées est de 0.1 µs il n'était pas possible de déclencher la 1ère sur la réflexion d'interface et de pouvoir capter l'impulsion de cette réflexion. On a donc déclenché les portes sur l'impulsion initiale du générateur avec un créneau d'effacement suffisant et une très grande largeur de porte (500 µs). En ajustant les seuils du compteur, il a été possible de faire des mesures: voir fig. 17.

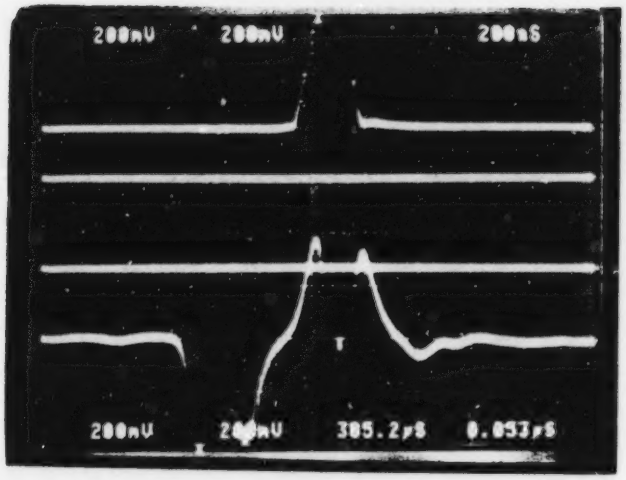


Fig. 17. Mesure entre la réflexion d'interface et le 1er écho d'une feuille de polyéthylène de ~ 0.020" (produite à l'IGM), transducteur ULTRAN 5MHz focalisé à 11" (les zéros des traces des seuils de déclenchement sont situés sur les lignes de base de la réflexion d'interface et de l'écho).

Finalement, on présente plusieurs traces illustrant le fonctionnement du système de contrôle automatique de gain.

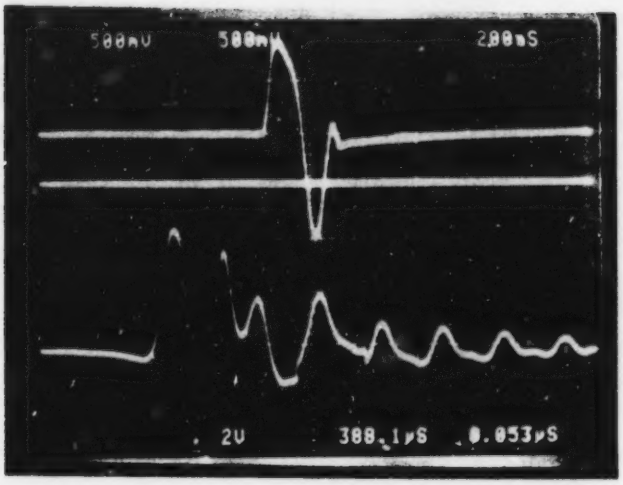


Fig. 18a. Illustration du système de contrôle automatique de gain: les traces supérieures représentent le 2e écho et le seuil de déclenchement, la trace inférieure représente la série des échos avec, superposée, la porte qui sélectionne l'écho (ici le 2e) dont l'amplitude maximum servira au contrôle du gain. La boucle de contrôle est ouverte, le gain est ajusté manuellement et la plaque (laiton de 0.0193") est orientée de façon à maximiser les échos.

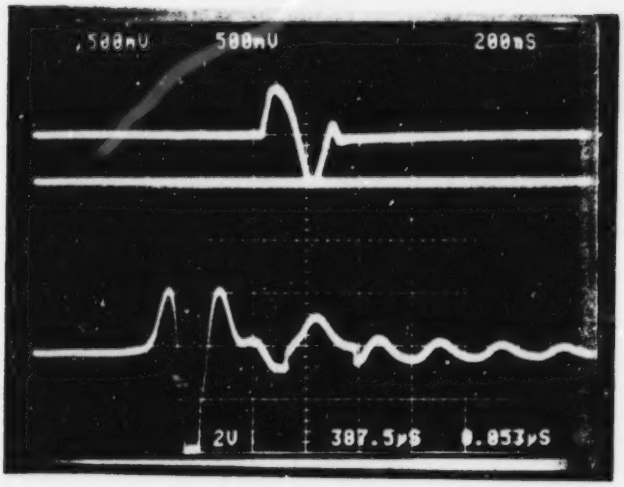


Fig. 18b. Même chose qu'en a, sauf que la plaque est désorientée: on voit que l'amplitude de l'écho tombe de moitié.

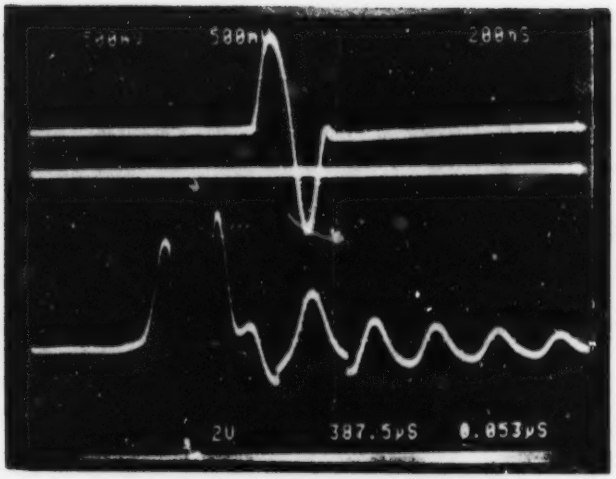


Fig. 18c. Même chose qu'en b, sauf que la boucle de contrôle est maintenant fermée: on voit que l'écho retrouve son amplitude initiale (fig. 18a).

L'effet de désorientation de la plaque et la compensation par le système de contrôle automatique de gain a été plus particulièrement étudié avec le transducteur focalisé de NDT Instruments (BTA-25). L'échantillon était une plaque de laiton de 0.1331" montée sur une platine orientable. Un petit miroir monté sur la plaque et un laser He-Ne permettait de mesurer le changement d'orientation. On a constaté que le système pouvait tolérer un changement de ±5°, ce qui correspondait à une diminution de l'amplitude des échos jusqu'à 15% de leur valeur maximum.

IV. Résultats obtenus avec les échantillons fournis par IVI.

La compagnie IVI nous a fourni trois bandes de laiton jaune (70 Cu-30Zn) d'épaisseurs nominales 0.0193" (= 0.490mm), 0.1331" (= 3.381mm) et 0.2728" (= 6.929mm) et une bande de laiton rouge (90 Cu-10Zn) d'épaisseur nominale 0.0265" (= 0.673mm). Ces bandes ont quelques pieds de longueur et de 5 à 7 pouces de largeur. On a découpé sur chacune un ou plusieurs échantillons et effectué des mesures d'épaisseur en plusieurs points au travers de la largeur de la bande (voir fig. 19).

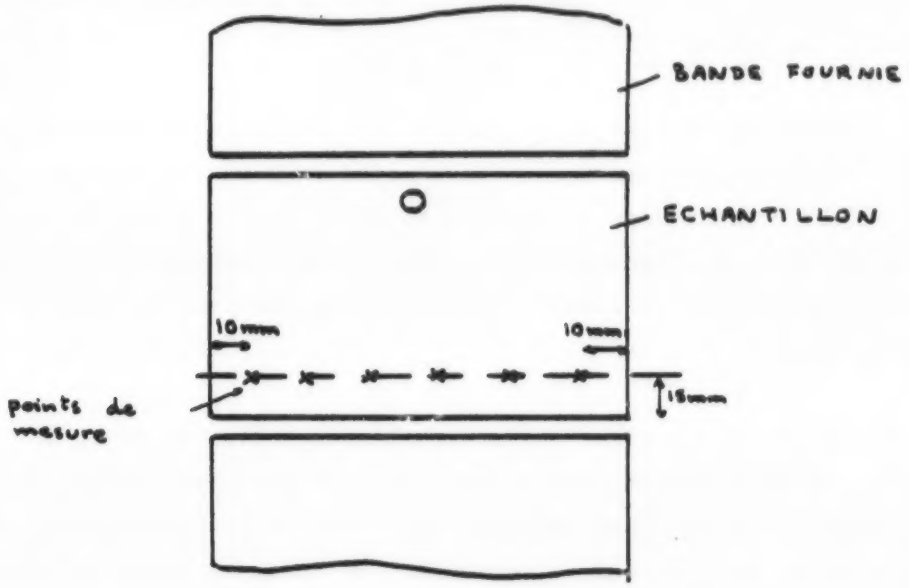


Fig. 19. Forme des échantillons utilisés pour faire les mesures d'épaisseur.

L'épaisseur a d'abord été mesurée en chacun des points choisis avec un micromètre (précision ± 0.0025mm). Ensuite, on a mesuré le temps entre 2 échos ultrasonores. Ces 2 mesures devraient être en parfaite corrélation si la vitesse est constante. En fait, la vitesse varie au travers de la bande et entre bandes de différentes épaisseurs (voir résultats ci-dessous). On a donc aussi calculé, pour chaque point, la vitesse en appliquant l'éq 1.

Des mesures ultrasonores ont été faites avec le transducteur focalisé de ULTRAN à 5MHz en immersion, et avec le transducteur de NDT Instruments couplé par jet d'eau pour tous les échantillons et pour les 2 plus épais par contact avec le transducteur plan de KB-Aérotech à 5MHz. Dans tous les cas, les résultats sont sensiblement les mêmes. Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus avec le transducteur de NDT Instr. et le couplage par jet d'eau (voir figs 20 à 24). Pour chaque échantillon, on a porté 3 courbes qui représentent la variation de l'épaisseur, du temps entre échos et de la vitesse au travers de la bande. L'abscisse de chaque graphique correspond à la même échelle avec la dimension dans le sens de la largeur de la bande.

Comme le compteur utilisé fonctionnait avec une base de temps de 10MHz (précision pour une seule mesure de l'ordre de 0.1 µs), on a moyenné sur 1000 ou 10 000 impulsions. Les précisions de chaque série de mesure sont indiquées dans les légendes des figures correspondantes (ces précisions ne tiennent pas compte des erreurs systématiques mentionnées dans la section précédente).

On constate d'abord que les épaisseurs mesurées avec un micromètre sont assez différentes des épaisseurs nominales et qu'elles varient au travers de la bande de façon assez systématique, ceci étant probablement dû au fléchissement des rouleaux de laminage. On constate aussi que la mesure de temps est généralement en assez bonne corrélation avec la mesure d'épaisseur faite avec un micromètre. Les déviations proviennent de la variation de la vitesse qui n'excède pas ± 0.01 mm/µs pour les échantillons les plus épais dans la partie centrale sur environ les 2/3 de la largeur. Pour les échantillons plus minces (laiton jaune et laiton rouge), la variation plus grande observée provient de l'imprécision de la mesure d'épaisseur et on peut admettre qu'en fait, la vitesse varie beaucoup moins. On note aussi que la vitesse varie de façon beaucoup plus importante sur les bords de la bande. Cette variation de vitesse n'est pas surprenante, car il est bien connu que les alliages de cuivre ont des propriétés élastiques anisotropes et présentent une forte texture qui varie avec le laminage et le recuit(3).

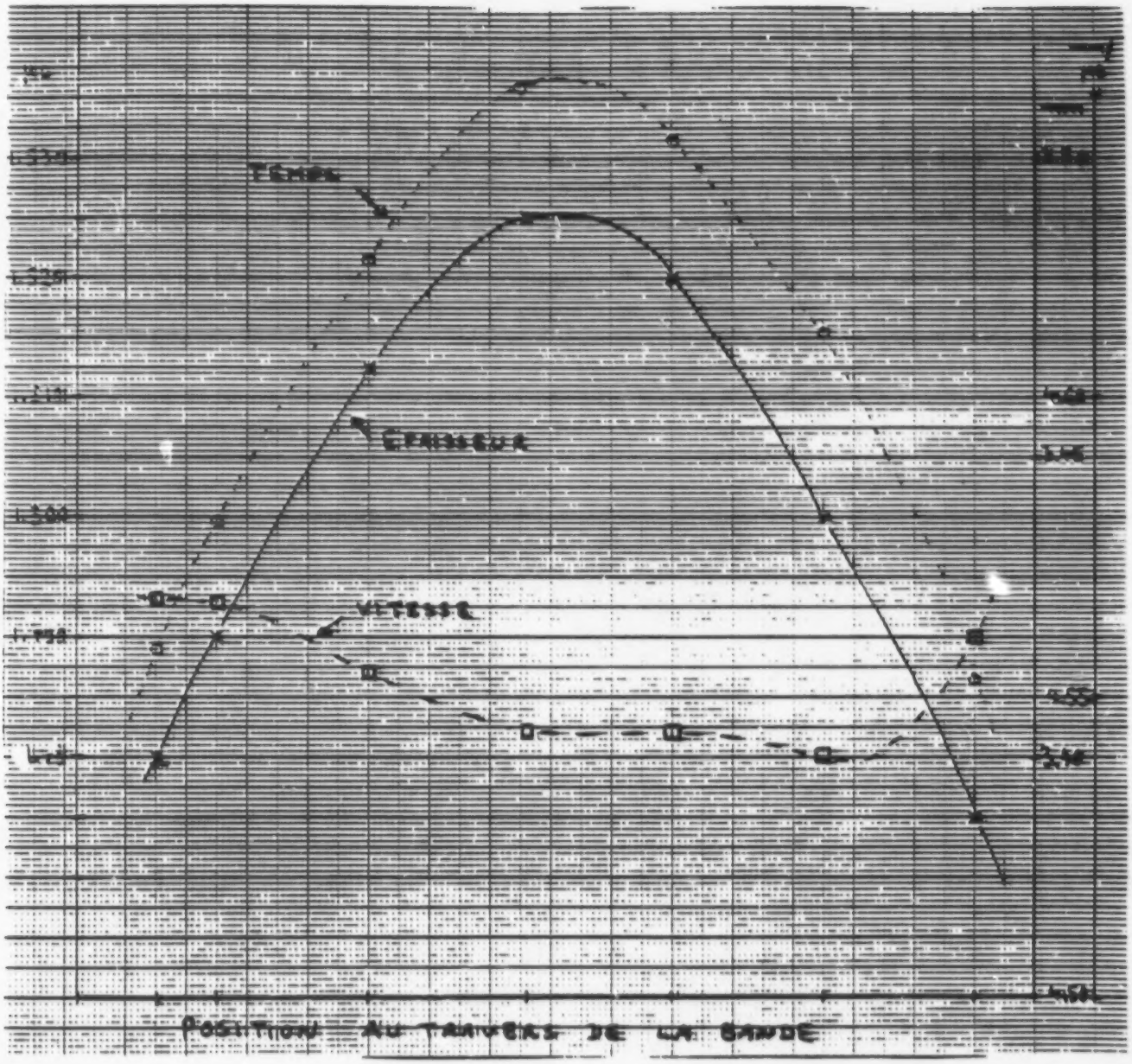


Fig. 20. Epaisseur, temps mesuré entre le 1er et 2e écho et vitesse au travers de la bande pour un échantillon de laiton jaune d'épaisseur nominale 0.1331" (3.381mm) coupé au centre de la bande fournie; épaisseur: ± 0.0025mm, temps entre 1er et 2e écho: ± 0.003 µs, vitesse: ± 0.013 mm/µs.

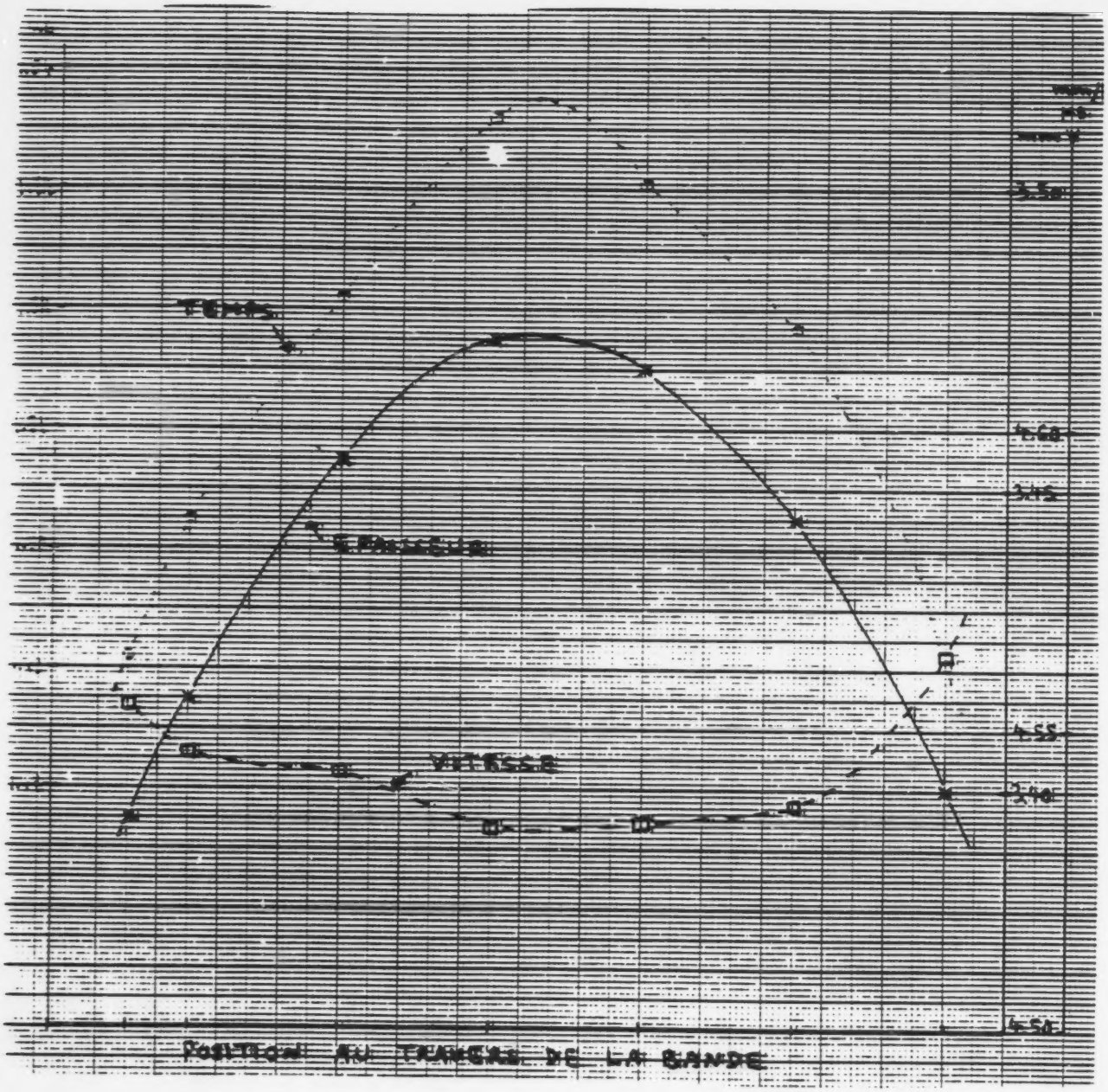


Fig. 21. Epaisseur, temps mesuré entre le 1er et 2e écho et vitesse au travers de la bande pour un échantillon de laiton jaune d'épaisseur nominale 0.1331" (3.381mm) coupé à une extrémité de la bande fournie; même précisions que pour l'échantillon de la fig. 20.

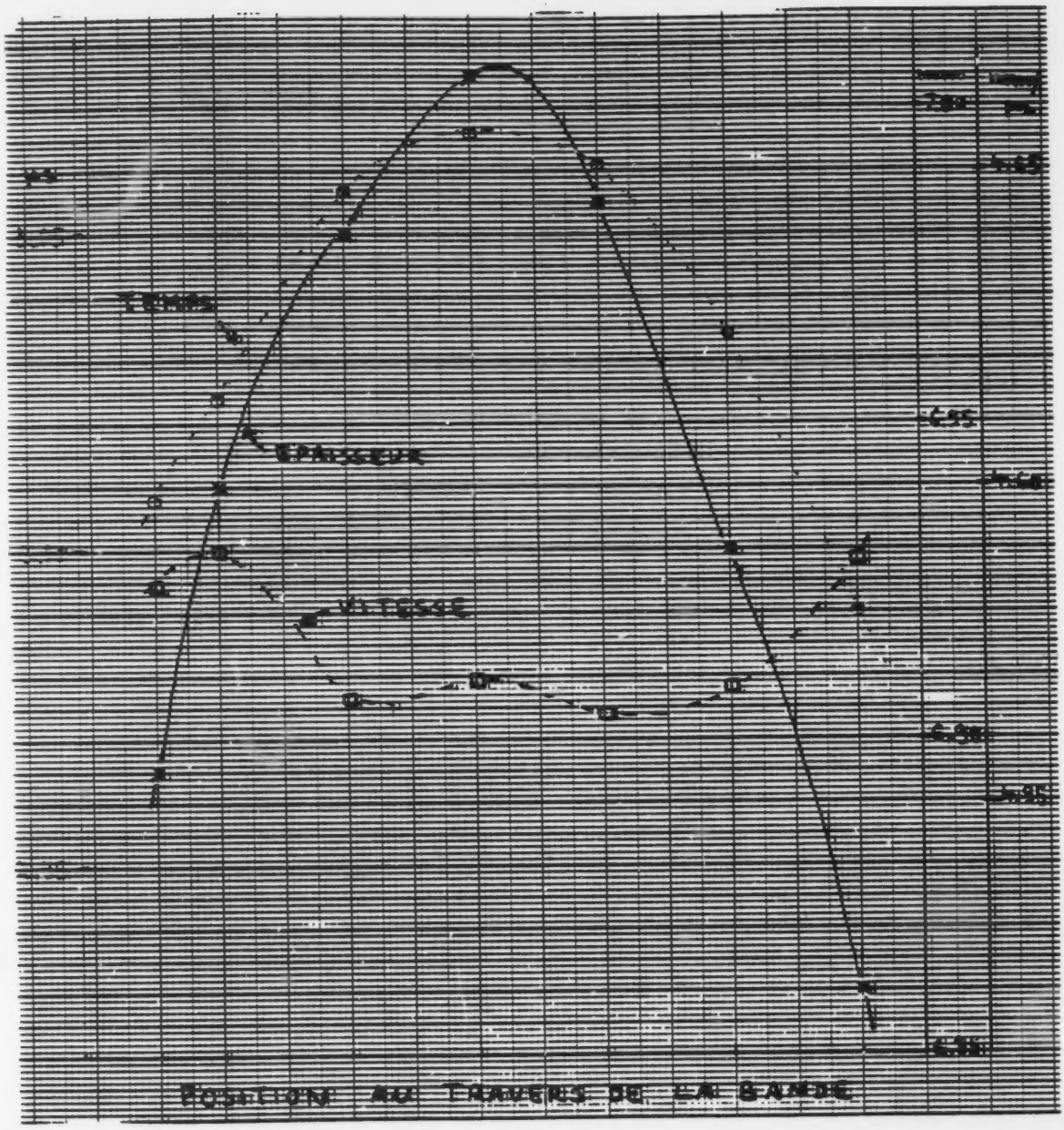


Fig. 22. Epaisseur, temps mesuré entre le 1er et 2e écho et vitesse au travers de la bande pour un échantillon de laiton d'épaisseur nominale 0.2728" (6.929mm) prélevé au milieu de la bande fournie; épaisseur: ± 0.0025 mm, temps entre 1er et 2e écho: ± 0.005 µs, vitesse: ±0.01 mm/µs.

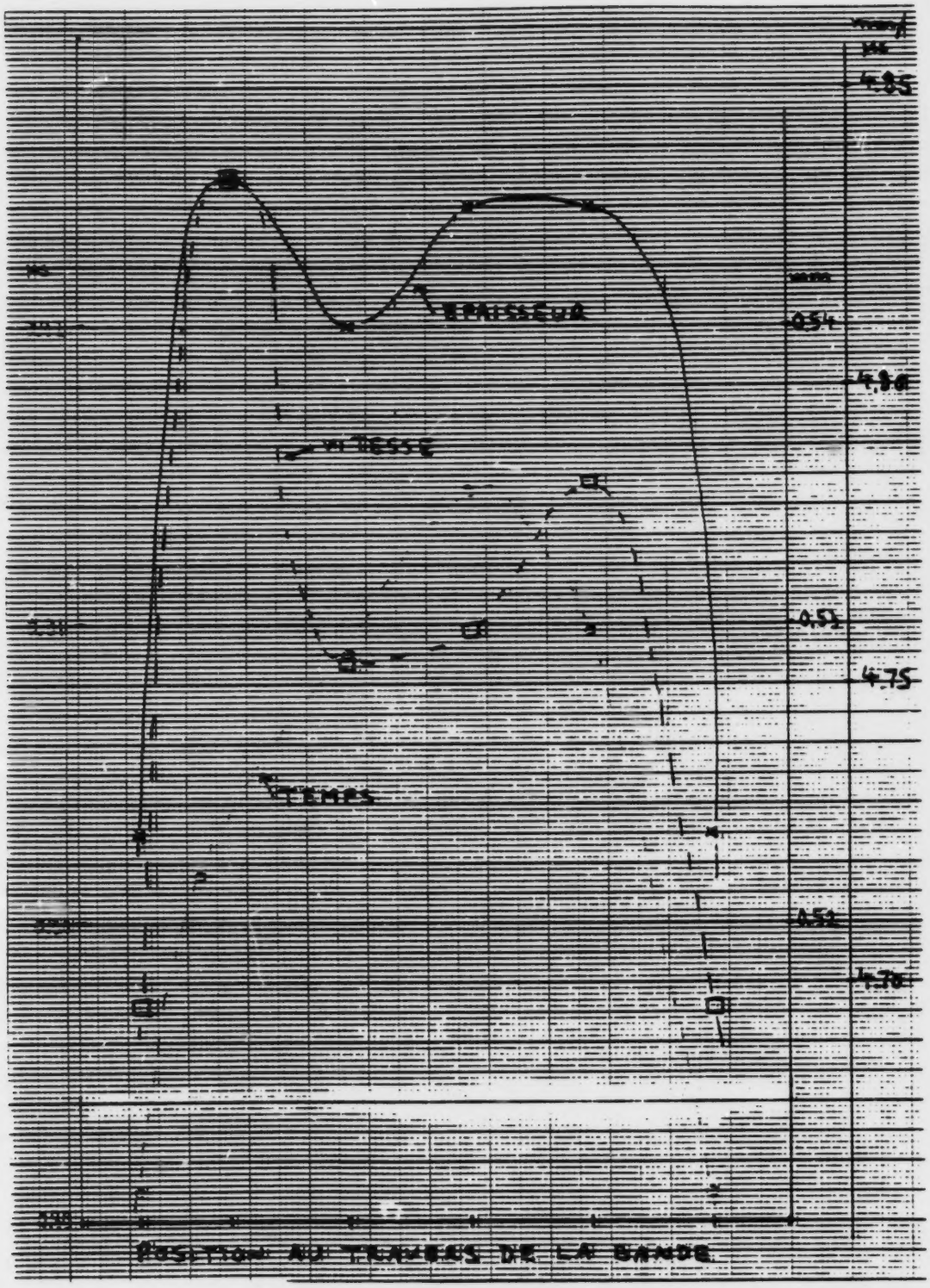


Fig. 23. Epaisseur, temps mesuré entre le 1er et le 5e écho et vitesse au travers de la bande pour un échantillon de laiton jaune d'épaisseur nominale 0.0193" (0.490mm), prélevé au milieu de la bande fournie; épaisseur: ±0.0025mm, temps entre 1er et 5e écho: ±0.003 µs, vitesse ±0.04mm/µs.

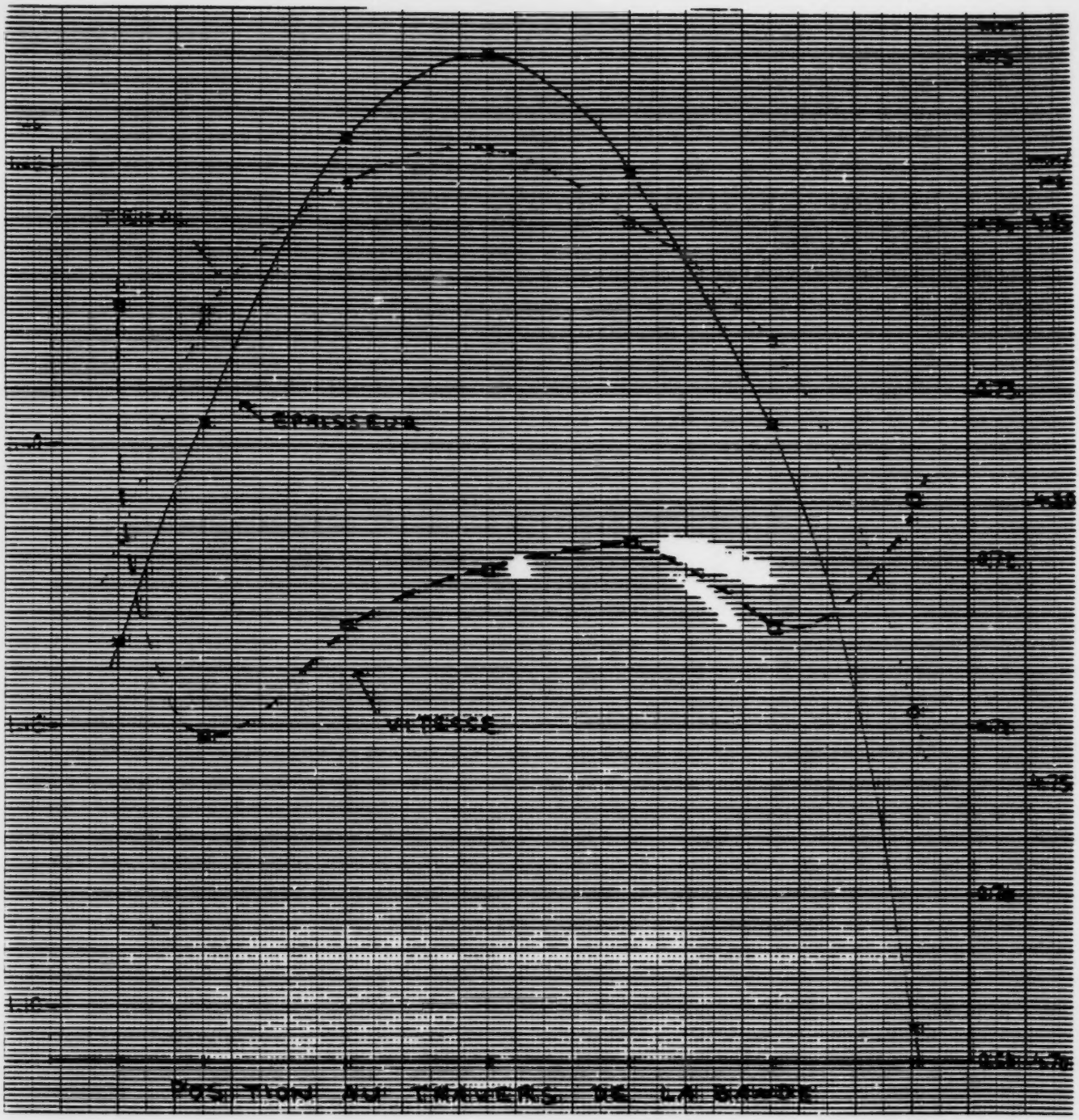


Fig. 24. Epaisseur, temps mesuré entre le 1er et le 5e écho et vitesse au travers de la bande pour un échantillon de laiton rouge d'épaisseur nominale 0.0265" (0.673mm) prélevé au milieu de la bande fournie; épaisseur: ± 0.0025mm, temps entre 1er et 5e écho: ± 0.003 µs, vitesse: ± 0.03 mm/µs.

Compte tenu de ces résultats, nous évaluons ci-dessous la précision sur la mesure d'épaisseur à laquelle on peut s'attendre en utilisant la technique ultrasonore. Si v est la vitesse et si t est le temps de vol au travers de la plaque (aller simple), l'erreur sur l'épaisseur ℓ est donné par la formule suivante:

$$\delta \ell = v \delta t + \frac{\ell}{v} \delta v \qquad (4)$$

La précision de la mesure du temps de vol au travers de la plaque est fonction de la fluctuation de la mesure d'un intervalle de temps entre 2 impulsions non répétitives, du nombre de coups moyennés (N) et du nombre d'intervalles d'échos(n) sur lesquels la mesure est faite. On a:

$$\delta t = \frac{\text{erreur sur mesure d'un intervalle de temps (non répétitif)}}{(2n \times \sqrt{N})} \qquad (5)$$

Si on utilise un compteur avec une base de temps de 300 MHz environ, l'erreur sur la mesure d'un intervalle de temps non répétitif sera 3 ns, au mieux, s'il n'a pas de cause de fluctuations autre que celle de comptage. Ceci donnerait pour n = 1 et N = 10, $\delta t \backsim 0.5$ ns (+ ou -). On a observé une fluctuation de cet ordre (la lecture faite varie de + ou - 1 ns) en utilisant le compteur Tektronix DC 5010, qui a une horloge de période égale à 3.125 ns, et constaté que le jet d'eau, le bruit du receveur, les fluctuations de déclenchement n'augmente pas le bruit de la mesure de temps de façon significative. Toutefois, pour les échantillons les plus minces, on n'a pas mesuré à partir d'un écho très près de la réflexion d'interface, car le jet d'eau produit un bruit additionnel au voisinage de cette réflexion qui dure $\backsim$ 0.5 µs. Ce bruit pourrait être augmenté quand la tôle est en mouvement rapide (turbulences additionnelles à l'interface), ce que l'on n'a pas essayé jusqu'à présent, mais ce qui pourrait être fait dans une phase ultérieure. Il semble, toutefois, qu'en prenant des échos suffisamment éloignés de la réflexion d'interface, on puisse avoir l'ordre de grandeur mentionné ci-dessus. Donc, si on utilise un compteur de 300 MHz et on prend N =10,

n = 1 on a $\delta t \sim 0.5$ ns, d'où $v\delta t \sim 0.0025$mm $\sim$ 1/10 000 pouce. La fluctuation de la mesure de temps cause donc une erreur qui est faible et peut, pour l'application industrielle considérée, être presque négligée.

En ce qui concerne la vitesse, nous supposerons qu'elle peut être connue à ± 0.01mm/µs. Cette valeur apparaît raisonnable si une calibration avec des échantillons mesurés avec un micromètre est faite pour chaque étape de la fabrication. On pourrait ainsi établir un tableau de valeurs donnant la vitesse à la suite de chaque laminage ou recuit. Pour les valeurs de la vitesse sur les bords de la bande, on s'attend cependant à une precision sensiblement moindre. Pour $\delta v \sim 0.01$ mm/µs, l'erreur $\ell\, \delta v/v$ atteint ~ 0.015 mm $\sim$ 6/10 000" pour $\ell \sim$ 1/4". Cette cause d'erreur est donc prépondérante pour les échantillons épais (> 0.050"). Le graphique ci-dessous (fig. 25) donne la précision que l'on peut raisonnablement attendre en fonction de l'épaisseur de la tôle mesurée (δv= ± 0.01mm/µs et δt= ± 0.5 ns).

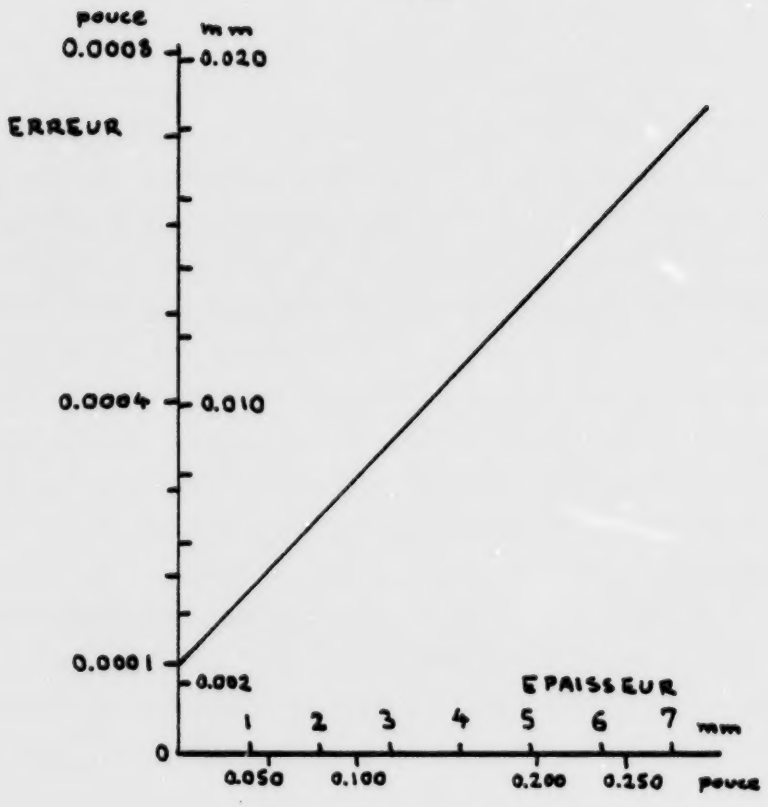


Fig. 25. Erreur (prévue) en fonction de l'épaisseur de la tôle; on a pris $\delta v = \pm 0.01$ mm/µs et $\delta t = \pm 0.5$ ns.

Comme la tôle est en mouvement, il est aussi important de considérer la résolution spatiale que l'on peut atteindre sur la tôle. Cette résolution est fonction de la vitesse de défilement de la tôle, du taux de répétition de l'impulsion du générateur et du nombre de coups moyennés (N). Si on suppose une colonne d'eau de 3 pouces, un aller-retour dans la colonne correspond à environ 100 µs. Pour éviter des problèmes de déclenchement sur les séries multiples d'échos provenant d'aller-retours dans la colonne (v. fig. 26), il est raisonnable de choisir un délai entre impulsions d'environ 5 fois cette valeur, ce qui limite le taux de répétition à 2000. Si on moyenne sur 10 impulsions, chaque mesure prend 1/200 s. Si de plus, la tôle défile à raison de 1000 pieds/minute ~ 5m/s, chaque mesure représentera une moyenne sur une longueur égale ~ 2.5 cm ~ 1 pouce. On obtiendra la même précision dans la mesure du temps et une résolution limitée à la dimension de la tache focale du transducteur (typiquement 2mm de diamètre)

en faisant une mesure entre des échos 3 fois plus espacés sans moyenner. Dans ce cas, les mesures seront faites tous les 2.5 mm.

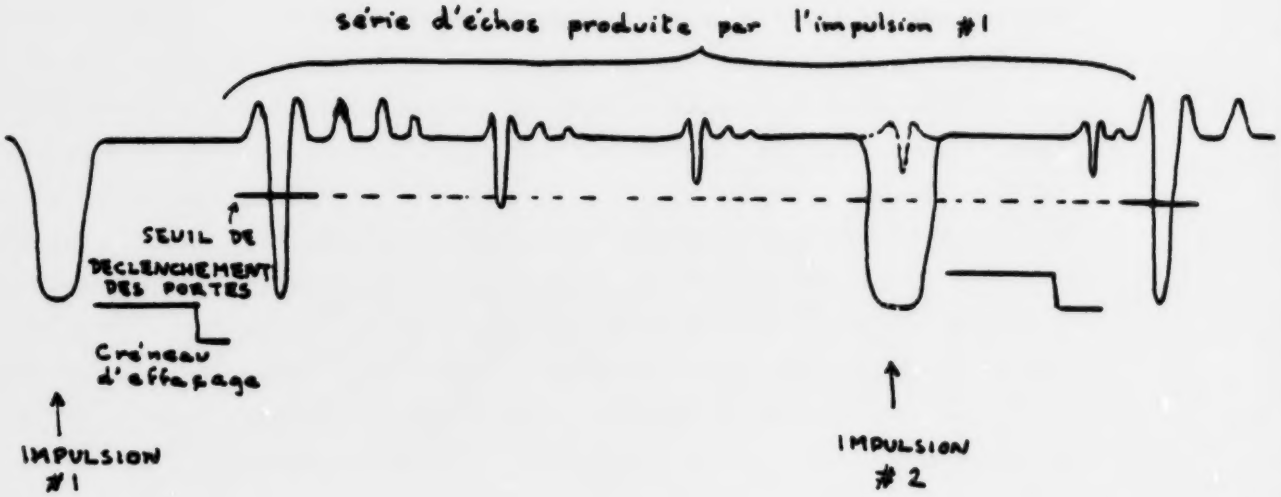


Fig. 26. Aspect qualitatif de tous les échos produits à partir d'une impulsion du générateur. Pour l'exemple montré sur la figure, un fonctionnement correct sera obtenu si le seuil de déclenchement est supérieur (en valeur absolue) à l'amplitude de la réflexion d'interface qui provient de l'impulsion #1 et qui tombe après l'impulsion #2 et son créneau d'effaçage.

Afin d'avoir une mesure d'épaisseur indépendante de la vitesse dans la plaque, on a aussi considéré (à la suggestion de L. Piché, IGM) d'utiliser 2 transducteurs avec jet d'eau, un étant situé au dessus de la plaque et l'autre en dessous. On mesure par ultrasons la longueur des 2 colonnes d'eau. Les transducteurs étant fixes, ces 2 mesures permettent, après calibration, de déduire l'épaisseur de la plaque. Comme chaque colonne d'eau a une longueur d'au moins 2.5", on déduit facilement que pour avoir une précision de 5/10 000", la vitesse de l'eau ne doit pas varier de $\sim 10^{-4}$ mm/µs. Comme la vitesse de l'eau varie d'environ 0.003 mm/µs.°C à la température ordinaire[4], la stabilité de température requise montre que cette approche est difficile à mettre en oeuvre dans le cas qui nous intéresse, si bien qu'elle ne fût pas poursuivie.

V. Evaluation du Novascope 2000 pour la mesure de produits plats en mouvement.

Le Novascope 2000 est un appareil mesureur d'épaisseur avancé (voir spécifications en annexe). Il permet de faire des mesures par contact ou avec un milieu donnant un délai. Son utilisation a été particulièrement étudiée avec le transducteur avec couplage par jet d'eau NDT BTA-25, (fréq. ~ 12 MHz). La mesure peut se faire à partir de la réflexion d'interface sur plusieurs aller-retours ou entre 2 échos quelconques mais sur seulement 1 aller-retour. L'intervalle mesuré est automatiquement déterminé à partir des 2 créneaux d'effacement, l'un partant de l'impulsion initiale ("Guard gate") et l'autre partant de la réflexion d'interface ("Blocking gate"). Généralement, avec les échantillons IVI, un fonctionnement stable a été facilement obtenu en mesurant à partir de la réflexion d'interface et beaucoup plus difficilement en mesurant entre 2 échos (l'ajustement du gain ou du niveau de "reject" et de la porte "blocking gate" était en général assez critique). Pour ces raisons et celles mentionnées ci-dessous, l'usage de cet appareil pour le projet concerné n'apparait pas recommandable. Les inconvénients qui ont été notés sont les suivants:

- mesure seulement entre 2 échos (d'aller-retour) consécutifs avec même seuil de déclenchement;

- le système indique l'épaisseur et doit être calibré avec 2 épaisseurs différentes (2 potentiomètres doivent être ajustés). Pour le projet concerné, il est préférable d'avoir directement la mesure du temps de vol et d'obtenir l'épaisseur en multipliant par la vitesse (de préférence de façon numérique);

- il n'y a pas de contrôle sur le nombre de coups moyennés;

- le système ne peut fonctionner avec plusieurs transducteurs multiplexés sans modifications qui semblent importantes.

VI. Conclusions et perspectives

On a monté en laboratoire un système pour mesurer l'épaisseur de produits plats en mouvement dans un milieu industriel. Ce système (utilisant un compteur approprié) permet de mesurer avec une précision qui rencontre en général les spécifications mentionnées par IVI (± 0.0006" pour le laiton jaune et ± 0.0003" pour le laiton rouge, pour plus de détails voir fig.25) On a aussi évalué un appareil commercial, le Novascope 2000, qui a été jugé peu approprié pour la poursuite du projet. A cette fin, et pour pouvoir faire de façon satisfaisante des essais et mesures en usine, il serait bon d'optimiser le système monté en laboratoire.

Le système qui est considéré est schématisé sur la fig. 27. Il est basé sur un receveur Matec (ampli RF du modèle 605 à l'exclusion du détecteur), 2 portes Metrotek, modèle MG 701, 3 préamplificateur/générateurs d'impulsions Metrotek, modèle PR 104P, et un compteur de la capacité du Tektronix modèle DC 5010. Chaque transducteur est excité N + 1 coups, le premier servant à contrôler le gain du receveur (afin de compenser pour un éventuel bombé du produit à mesurer) et les N suivants permettant une mesure de temps moyennée. La séquence des signaux TTL produits par un contrôleur de séquence (à construire) servant à déclencher les générateurs d'impulsions et à bloquer le compteur est schématisée sur la fig. 28. Le contrôleur de séquence produit aussi des signaux contrôlant l'affichage et l'enregistrement des résultats. Cette partie du système reste à préciser, mais on peut penser à un affichage numérique des 3 temps mesurés et un enregistrement graphique des différences par rapport à une valeur préétablie. Le contrôleur de gain est celui schématisé sur la fig. 6. Comme il n'est pas nécessaire de mesurer avec précision et linéarité le maximum du premier écho choisi, on prévoit de construire un détecteur de maximum simplifié au lieu d'utiliser par exemple un module Metrotek. La séquence de fonctionnement de ce détecteur est schématisé sur la fig. 29. Pour l'affichage des échos et des seuils de déclanchement, il est fait usage d'un oscilloscope double trace intensifié par les 2 portes superposées. Sur un canal, on envoie le signal RF et sur l'autre, les 2

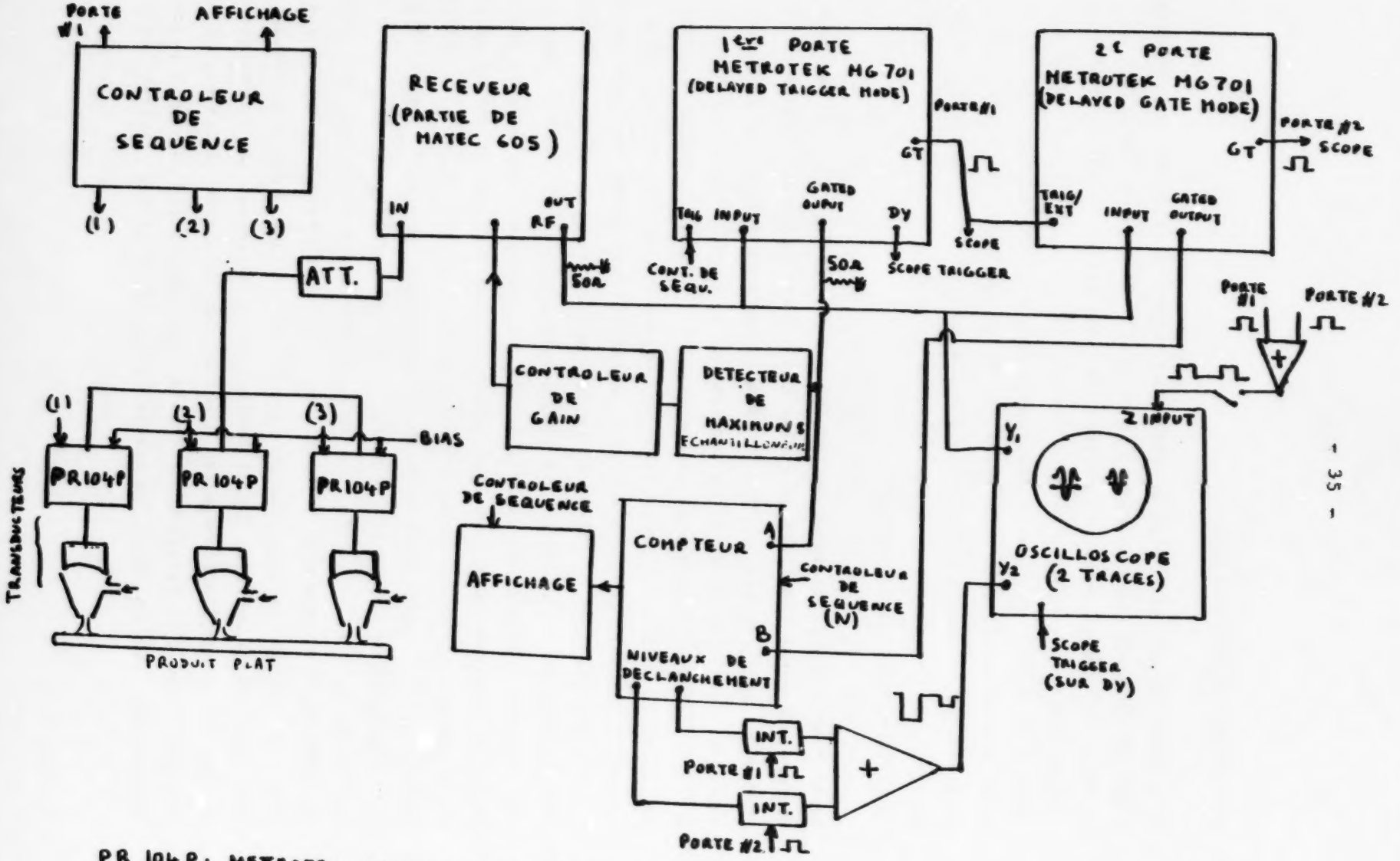


Fig. 27. Bloc diagramme du système proposé pour la poursuite du projet.

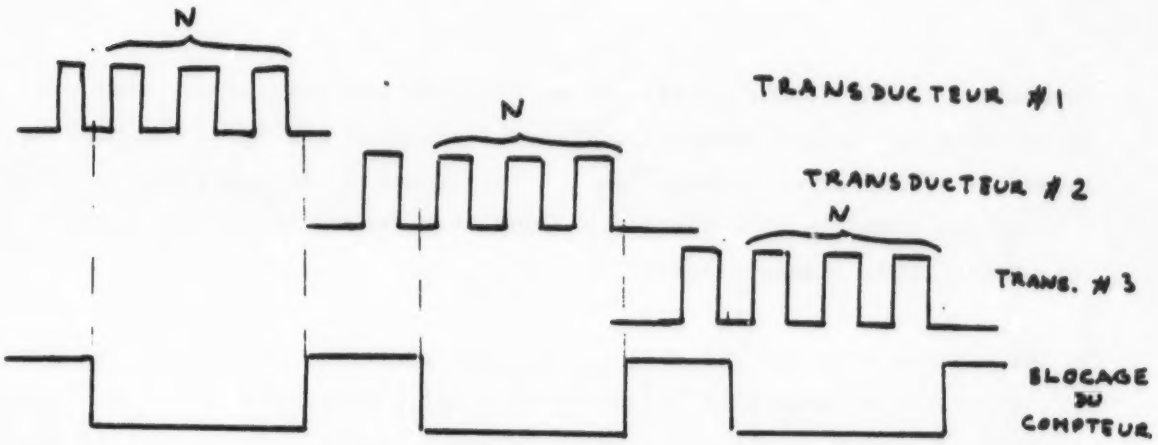


Fig. 28. Signaux TTL produits par le contrôleur de séquence pour déclencher les générateurs d'impulsions et bloquer le comptage.

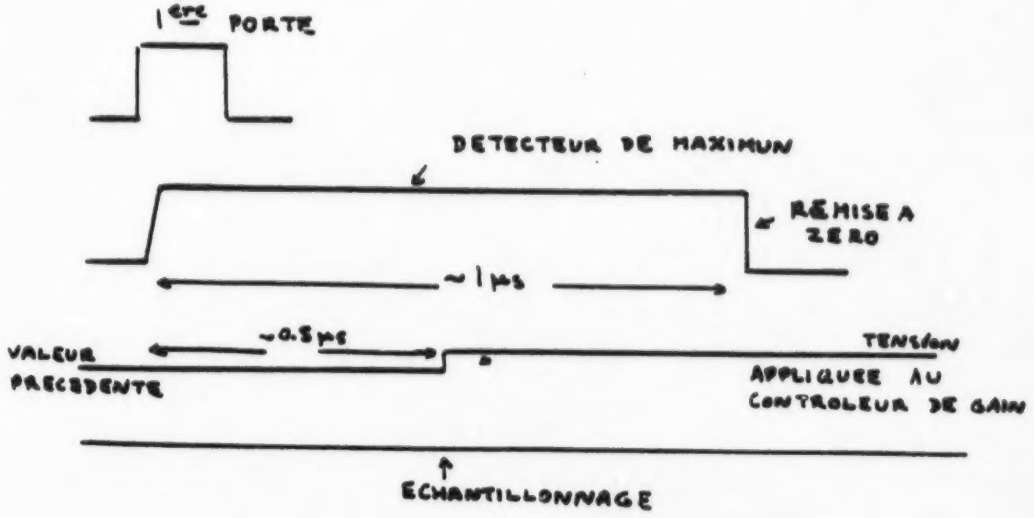


Fig. 29. Séquence des signaux produits par le détecteur de maximum proprement dit et son échantillonneur ("sample and hold").

niveaux de déclenchement superposés et découpés par les portes (voir fig. 26). Un interrupteur manuel permet d'afficher l'ensemble des échos ou uniquement la partie sélectionnée intensifiée. L'oscilloscope déclenche sur la réflexion d'interface comme la 1ère porte (le signal est fourni par le module Metrotek produisant cette première porte).

Un tel système envisagé est particulièrement approprié pour faire des mesures sur des produits plats métalliques et du plastique en feuille qui est peu absorbant du point de vue ultrasonore. Dans le cas de plastiques tel que le polyéthylène, des modifications importantes devraient être apportées afin de pouvoir faire une mesure à partir de la réflexion d'interface.

Références

1. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, 2nd edition, Springer-Verlag, 1977, chap. 11.

2. Réf. 1, chap. 2.

3. R.E. Green, Jr., Ultrasonic investigation of mechanical properties, Treatise on Material Science and Technology, vol. 3, Academic Press, 1973, chap. II D.

4. Tables of Physical and Chemical Constants, by G.W.C. Kaye and T.H. Laby, 14th edition, (Longmans) 1973.

APPENDICE

SPECIFICATIONS DU NOVASCOPE 2000

PRINCIPLE	Pulse-echo ultrasonic.
DIGITAL DISPLAY	Four-digit light emitting diode (LED).
DIMENSIONAL READOUT	English and metric (Selector Range Switch).
GAGING RANGE	English: 0.005" - 10"; Metric 0.13 mm - 100 mm (depending on material).
DIGITAL RESOLUTION	English Range: ± 0.0001" on 1"; ∓ 0.001 " on 10" — Metric Range: ± 0.001 mm on 10 mm; ∓ 0.01 mm on 100 mm
GAGING ACCURACY	Approaches digital resolution (function of material, couplant and electronics).
SCOPE READOUT	Dual Trace (ultrasonic A-Scan and Gates display).
SCOPE CONTROLS	Sweep (speed), Intensity and Focus.
CRT SIZE	8 X 10 cm.
RECEIVER GAIN	AGC level adjustable, plus Norm switch position.
MODE	Selector Switch For Immersion (Noncontact) or Contact/Delay.
GATES	BLOCK: Adjustable for blanking out transducer ringing. T : Echo period across which gaging is occuring. GUARD: Adjustable for blanking out noise in couplant stream. (All gates displayed on scope via selector switch).
ALARMS	Adjustable LO and HI Level with selectable LO, HI, or LO/HI Response.
REAR PANEL OUTPUTS	Thickness BCD, Thickness Analog, Alarms (LO, HI, LO/HI), IP Sync.
REAR PANEL SWITCHES	Transmitter Rep Rate (500, 1000, 2000, and 5000 pps), Transmitter Power (LC and HI), Thickness Gating (First Echo and Multiple Echo), RF (Pos. and Neg.).
POWER SOURCE	120 V and 240 V AC (Switchable Externally), 48 - 62 Hz.
POWER CONSUMPTION	40 Watts Approximately.
SIZE	11" w X 5⅝" h X 10½" d (27.5 cm w X 13.7 cm h X 48.1 cm d).
WEIGHT	19 pounds (8.6 kg).